基于激活扩散模型的认知图谱构建权重影响研究*

李晓璐 钱怡玲 李建生 李艺 李奇 徐朝军*
南京师范大学教育科学学院，江苏南京 210000

*本文系国家社会科学基金教育学一般课题“基础教育知识图谱构建方法与应用模型研究”（项目编号：BCA190087）研究成果之一。
作者简介：李晓璐（ORCID: 0009-0004-2217-3882），硕士研究生；钱怡玲(ORCID: 0009-0001-7961-8895)，硕士研究生，E-mail:1473749961@qq.com；李建生，教授；李艺，教授；李奇，硕士研究生；徐朝军，副教授，通信作者，267440207@qq.com。

摘要：[目的/意义] 针对目前认知图谱缺乏通用赋值机制、检索或推理过程解释力不足、图谱冗杂导致过高认知负荷等问题，提出一种基于激活扩散模型的认知图谱构建方法，来优化认知图谱的权重分配并进一步提高认知智能。[方法/过程] 首先，分析认知图谱目前的局限性并提出解决方案。其次，以解决方案为依据设计基于激活扩散模型的认知图谱构建过程并融合激活扩散模型中的能量的获得分配与衰减、激活状态判断、激活范围限制等计算公式，提出了基于激活扩散模型的认知图谱构建方法。[结果/结论] 通过对本文提出的激活扩散模型与传统的基于频次统计的认知图谱构建权重计算方法作的对比试验，结果显示基于激活扩散模型的认知图谱具有更强的细节揭示能力和一定的灵活性、可以呈现更多层次的权重分布，且权重赋值具有可靠性，并可以证明构建结果的因果不对称性。基于激活扩散模型的认知图谱构建权重计算方法对提升认知图谱的认知智能有着明显的效果，可以形成具有认知偏好和差异的认知图谱。

关键词：认知图谱；激活扩散模型；权重计算；认知智能；激活能量

分类号：G250

1 引言

随着人工智能相关研究的高速发展，人类客观世界中的诸多领域问题都可以使用人工智能相关应用得以解决。然而即使处于智能化的今天，人工智能的“智能”仍然受到许多学者的质疑。这是因为目前出现的人工智能大多是由大数据驱动，其任务的完成通常需要经过复杂模型的多层计算，而这个过程由于缺乏可解释性的机制而被认为是一种“黑箱”。对于人工智能中的“智能”的理解，虽然不同的学者持有不同的观点，但大多都同意“模拟、扩展、延伸人类智能”的这一说法，人工智能最开始就是以人类作为参照，实现对人类认知、思考、决策的模拟。也有学者将人工智能的智能分为了三个发展阶段：即计算智能、感知智能以及认知智能。其中计算智能是以数据为基础通过手段建立功能模型，而感知智能则是对数据的大规模采集与结构化处理，而认知智能则需要机器具有主动思考和理解的能力，可以实现自我学习。为了实现认知智能，学者们意识到了“语言”在人工智能学习中处于重要地位，自然语言处理技术得到了长足的发展，知识图谱也逐渐登上了人工智能的舞台。知识图谱进一步为认知智能开拓了新的道路，因为它在数据描述能力上具有足够的优势，可以从语义层面改善检索的质量，可以描述客观世界中存在的各种实体以及它们之间的联系，也可以有效地组织管理大量数据信息。

随着知识图谱广泛地发展与应用，逐渐衍生出了认知图谱（cognitive graph）这一概念，认知图谱本质上仍然是一种语义网络，但却体现出了比知识图谱更强的推理能力。张玉柳、赵波也强调“认知”技术是整个人工智能研发中绕不开的关键技术，而认知图谱正是知识图谱与认知智能的结合[1]。对于认知图谱的定义，国内外仍然未有完全定论，但可以概括为注重于模仿人类的认知，与认知心理学、脑科学领域相关，并跨越领域知识图谱、因果推理、持续学习等技术，构建稳定获取和表达知识的有效机制，让知识能被机器理解和运用以

实现认知智能的突破。认知图谱常以心理学中的“双通道理论”为基础，具有更强大、更灵活的推理能力。双通道理论认为人类推理系统由一个隐性的潜意识系统检索相关的信息（System1）以及一个明确的、有意识、可操控的推理过程对收集的信息进行推理（System2）组成的[2]。系统 1 替人类完成简单的、直觉的思考，系统 2 则替人完成复杂的，基于经验的逻辑推理[3]。这两种系统一个是联想的，它的计算反映了相似性和暂存的机构，负责编码和加工多种特征间环境、频率和联系的统计规则。一个是符号的，它的计算反映了基于规则的结构，其计算原则基于规则推理。从 Elizabeth R. Chrastil and William H. Warren[4]以及 Michael Peer 等人[5]的论文中也可以发现 cognitive graph 可以被理解一种人脑内存储的与欧几里得空间距离不同的抽象后的拓扑结构，也属于一种空间知识的可做标记的表示方式。赵国庆,李欣媛,路通等人则认为认知图谱是跨学科概念“认知地图”（cognitive map）在计算机领域的术语表达[6]，因此计算机中的认知图谱可以借鉴各领域中关于认知地图的研究。作为知识的组织和可视化工具，认知地图是在过去经验基础上建立的代表外部环境的内部表象，在心理学中也出现过类似的术语“图式”、“知识经验结构”等，它们都可以被术语“认知结构”所统一[7]。心理学家斯腾伯格于 1985 年提出有关个体认知结构的三成分:元成分、操作成分和知识获得成分[8]。知识获得成分是对情境中的信息进行筛选抉择，并将新信息与已有知识相匹配，其特点是具有选择性。元成分则是对具体认知过程中的其他成分进行调控，这是认知发展的重要基础，操作成分则是对问题进行解决，包括编码、推理、联系与应用。可见认知图谱的构建应该体现信息的选择性、认知结构的调控并有利于问题的解决。

然而目前对于认知图谱的构建常常采用与知识图谱构建相同的方法,许多学者通过结合机器学习和知识图谱的构建来实现认知图谱的高阶“认知智能”。可见，目前对于认知图谱的构建上缺乏一种与人类认知过程相符合、提高认知图谱认知智能的一种构建方法。此外，国内在认知图谱的构建中很少使用权重这一属性作为认知图谱的实体与关系的信息,而在知识图谱领域中则有一些构建带有权重的知识图谱的案例,携带权重信息的图谱无论在知识可视化展示还是知识推理中都展示出了更优越的性能。认知图谱中的节点和边如果携带权重，则可以使用权重的大小去表现认知图谱中节点和边的可靠性或强度,这也基本符合心理学对人类认知的基本假设。因此，本研究提出了一种以心理学认知模型——激活扩散模型为基础的、用于构建认知图谱的方法，并通过设计激活扩散过程对认知图谱动态赋予权重值，以实现对认知图谱认知智能的优化。

2 现有认知图谱构建方法存在的问题分析

现有认知图谱的构建方法主要集中在满足基于直觉与基于规则的两种推理方式上,从而使认知图谱能够实现特定的检索或推理功能.DING M 等人提出一个新的 CogQA 框架来实现 web 规模文档的多跳问答，并基于 BERT 和图神经网络来实现对隐式提取模块和显式推理模块两种系统的模拟[9]。DU Z X 等人实现了一次性知识推理的认知图谱，该认知图谱划分了摘要模块和推理模块，摘要模块总结给定实例的基本关系，推理模块据此推断正确答案。为了

补充检索空间的先验知识，在摘要模块中使用神经网络根据图神经网络生成的实体对向量表示推断实体对间的关系，推理模块包含着从知识图谱中检索信息的 system1 和根据收集到信息进行推理的 system2，其中 system2 使用深度学习进行关系推理[2]。然而这些构建认知图谱的方法和技术本质上与构建知识图谱未有差别，仍然存在着认知图谱缺乏通用的赋权机制、认知图谱检索或推理结果缺乏解释力、认知图谱冗杂易导致认知负荷过高等问题。

2.1 认知图谱缺乏通用的赋权机制

目前对认知图谱的构建存在过于机械和缺乏通用赋权机制的问题。这是因为认知图谱的构建结果完全取决于输入数据，而对于一般的知识图谱赋权常采用频次统计或语义距离计算等方法赋予权值，这会导致认知图谱的赋权结果难以发生改变。这样的认知图谱虽然增加了可靠性，但同时也缺乏了灵活性，这种认知图谱构建的方法也不符合认知智能的要求。灵活的认知图谱构建结果应当既具有一定的可靠性又能使得构建结果根据数据的输入顺序不同而有所差异。王忠群、叶安杰、皇苏斌等人对知识图谱进行赋权扩展，再构建在线商品评价语义网来计算商品的可信度并排序[10]。孙昊天、杨良斌在统计共现次数的基础上实现新的基于带权三元闭包来构建时政类微博以亲密程度为关系知识图谱[11]，可见，对于权重的计算和赋值，存在对知识图谱和语义网络赋值的案例，但目前并未出现一种通用的方法实现认知图谱的权重计算。

2.2 认知图谱检索或推理过程缺乏解释力

现有的认知图谱中多以构建基于双通道的推理机制为重点，多采用机器学习等方法来实现复杂的推理功能。褚润夫在使用认知图谱设计井下作业知识推荐系统研究中，在模拟认知图谱中认知推理模块使用了基于上下文的图神经网络推荐模型[12]。袁满、张维罡、李明轩运用 BERT+CRF 以及 GCN 提出了基于认知图谱的智能问答推理模型[3]。以上认知图谱可以取得很好的应用效果，但常常由于其黑箱机制而不具备强解释力。

而认知图谱作为认知智能的延伸需要在检索、推理机制中具有认知的可解释特征。这需要认知图谱能够解释检索结果或推理结果，即为什么对该问题的检索和推理结果是 A 而不是 B。

2.3 认知图谱冗杂导致过高的认知负荷

在现有的认知图谱构建过程中，相同实体的合并不会对实体间的链接产生影响，即在认知图谱中链接只有关系类型的区分而没有链接强度的表示，这不利于对认知图谱中链接的重要程度进行判断，这会导致认知图谱可视化的结果冗余过高，很难从中收获重要的信息，而链接强度可以解释为可靠性和重要性。在知识图谱研究中，有人提出完整的知识图谱呈现将给学习者带来超额的外在认知负荷。赵国庆等人认为未来可以基于认知负荷理论，借鉴教育心理学中概念图相关研究的思路，分别构建宏观图、中观图和微观图，可以降低学生使用图

示的认知负荷[6]。因此，区分认知图谱的节点层次可以在降低认知图谱使用者的认知负荷上具有重要价值，认知图谱的实体也应该通过不同的强度加以区分和标记，以体现认知图谱中实体地位的不同。

3 基于现有认知图谱局限性的解决方案

为解决以上问题，本文基于心理学认知理论——激活扩散模型，提出一种携带权重的、可以根据数据动态输入而灵活变化的认知图谱构建方法，目的是提高认知图谱的解释力和认知智能。

3.1 以迭代方式推动认知动态构建

迭代法是在计算数学中，一种不断用变量的旧值递推新值的过程也，是用计算机解决问题的一种基本方法。在心理学中，“认知结构”的不断变化依赖着已有知识与外界信息之间的交互，从而推动认知结构的调整和变化，迭代法则是实现新知识融入已有知识结构的有效手段，使用迭代方式构建认知图谱，使每次迭代的结果都与上一次迭代的认知图谱的结果密切相关。现有的认知结构和新的认知结构不断地进行同化和顺化的迭代过程，在其发展过程中就是习得新知识的过程[13]。目前在认知图谱的构建中有应用迭代方法，Ding M 等人提出的基于认知图谱的问答系统中就通过迭代 system1 和 system2 来逐步构建认知图谱[9]。Du Z X 等人提出的应用于一次性知识图谱推理的认知图谱模型也通过在认知图谱上迭代地实行扩展和推理来模仿人类的推理过程[2]。可见使用迭代方式构建认知图谱有其必然性和合理性，它模仿了人类认知结构的演变过程并使得认知图谱具有更强的解释力。

3.2 以激活扩散模型为权重计算机制

认知图谱的本质仍然是一种语义网络，为了让网络中的节点和链接具有不同的强度，需要确定网络中的权重计算机制。例如，在国内，刘璐等人为提高引文网络社区划分的准确性，构建了基于词汇语义加权的引文网络[14]。王现臣则针对情报分析中用户个性化需求预测的问题，从语义特征角度出发，提出了两种加权二分网络预测算法[15]。熊回香等人则通过对异质信息网络进行加权以实现学术信息推荐[16]。在对知识图谱的研究中也存在着加权知识图谱的构建，孙昊天、杨良斌提出了以带权三元闭包为基础构建时政类微博知识图谱的方法[11]，王忠群等人则对知识图谱进行赋权扩展，以领域常识、商品测评和领域专家作为信息源构建带权知识图谱[10]。综合以上研究可以发现，对于权重的扩展和赋值，常使用领域专家所设置的规则作为赋权依据，且权重的分配更取决于具体的问题情境，并不存在一种统一的权重分配方法，这种由专家制定规则的带权网络和知识图谱已经被证实对于问题解决具有更好的效果，然而却仍然缺乏对这种机制的解释，或者说带权网络和带权知识图谱的出现最开始并未以提高认知智能为目的，而是以更好地解决应用问题为目的。因此，为了提高认知图谱的认知智

能，本研究选择以心理学认知理论——激活扩散模型作为带权认知图谱中的权重分配机制，旨在使认知图谱具有强解释力的认知智能，并起到调控认知结构的作用。

激活扩散模型（Spreading Activation Model）是由 1975 年被 Collins 和 Loftus 提出的一种语义网络模型。Collins 和 Loftus 在 Quillian 的研究基础上提出：在语义记忆中准备的影响（或启动）被解释为根据从启动概念节点的激活扩散。这是一个被设计用来展示在计算机中如何构建人类语义结构和进程的理论，而不是解释数据的理论。激活扩散理论可以解释实验中不同组合的节点会导致不同的反应时间，Collins 和 Loftus 将其描述为：第一个概念启动第二个概念的数量决定着反应时间。根据 Yorick Wilks 的说法，“传播激活是网络上的一种程序理论，它可以实现一系列现象，并且已经做到了”。 Ashcraft 认为，激活和启动的传播过程是相互关联的——这些现象使人们能够接触到语义信息，他认为激活扩散机制导致与概念高度关联（占优势的）的属性可以更好地启动。[5]

激活扩散同时是搜索联想网络、生物和人工神经网络或语义网络的一种方法。大多数情况下，这些“权重”是随着激活通过网络传播而衰减的真值。当权重是离散的，这个过程往往被称为标记传递。激活可能起源于交替路径，由不同的标记标识，并在两个交替路径到达同一节点时终止。搜索过程通过给定一组源节点（例如，语义网络中的概念）并标注权重或“激活”开始的，然后迭代地传播或“扩散”到其他与源节点相连的节点。

在认知心理学中，激活扩散是关于大脑如何通过相关联的网络提取具体信息的理论[18]。激活扩散模型意味着人们组织他们基于个人经验的世界知识，即那些个人经验形成了思想网络，也就是这个人对世界的知识[19]。与心理学领域的其他语义网络模型有所不同，激活扩散模型抛弃了概念的层次结构，选择以语义联系和语义相似性等关系将概念之间连接起来。概念间的连线可以表示它们的联系，连线的长短可以表示概念间的紧密程度。当一个概念受到刺激时，该概念节点就会产生激活，然后激活沿节点的连线同时向四周扩散，与这个节点联系越紧密的节点接受激活的速度越快，强度越大，因激活量有限，随时间的推移和距离变远，激活在网络中的扩散逐渐减弱，当沿不同连线扩散的激活在某一个节点上交叉，并使其获得的激活总量达到阈限时，产生这种交叉的网络通路会受到评估，根据评估的结果，网络做出提取某种信息的决策。激活扩散模型属于预存式模型，但要使用搜索和决策两个加工环节。在检索的过程中，激活扩散从外界信息所刺激的节点产生并根据该语义网络中各单元的紧密程度进行路径检索。

通过对激活扩散模型进行分析，我们可以发现激活扩散模型是一种以网络为结构，符合人类认知灵活性，足以实现检索功能和权重计算的心理学理论模型，该模型完美契合了认知图谱的结构、属性以及处理信息数据的方式。本文尝试将激活扩散模型作为认知图谱中的权重增加机制，将认知图谱的权重变化视为认知模型中网络中边和节点的权重调整，以此得到认知图谱权重分配的规则。

3.3 数据输入与图谱构建同时进行

在传统的知识图谱和认知图谱构建中，通常采用两种构建方式——自顶向下(top-down)的构建方式与自底向上(bottom-up)的构建方式，其区别在于定义本体和加入实体的先后，自顶向下的构建方式需要先定义好本体和数据模式，再将实体加入知识库，而自底向上则是从一些开放链接数据中提取实体加入知识库再构建顶层的本体模式。在知识图谱的构建技术方面，刘峤等人提出的知识图谱技术框架包含了信息抽取、知识融合和知识加工的过程[20]。徐增林等人则认为知识图谱构建的关键技术主要包含知识抽取、知识表示、知识融合、知识推理四类[21]。综合多数学者的研究可以发现，构建认知图谱的主要步骤包括信息抽取、本体构建、知识融合、知识表示，即构建认知图谱的知识在构建前已经得到确定和处理，这样的好处是构建出的图谱具有良好的结构，每个实体都具有较高的价值，但也存在缺乏实体之间影响，不够灵活的缺点。

综合以上研究，为了能够实现动态地、能够跟随信息变化而构建认知图谱，本文使用自顶向下的构建方式，事先对认知图谱的本体进行定义，然后再根据信息不断地加入实体，并在加入实体的同时构建认知图谱并可视化，即信息抽取、知识融合以及知识表示步骤将同时进行。

4 基于激活扩散模型的认知图谱构建

本研究中，我们假设概念就是认知图谱中的一个个实体，反映在网络中就是一个个节点，因此，在激活扩散机制下，我们通过认知图谱中的权重来表现概念之间的关联属性，并通过使用激活扩散模型中的计算机制，更新认知图谱的权重，将新的权重作为下一次激活扩散行为的判断依据。在进行激活扩散的过程中，检索路径经过的节点均存在不同程度的记忆增强，体现在数值上就是权重的增加。图 1 为基于激活扩散模型的认知图谱构建方法的全流程图。首先从文本数据中按照依存句法进行信息抽取，抽取内容包含实体抽取、关系抽取以及属性抽取，信息抽取后形成的实体根据已定义的本体参与图谱构建，在实体进入图谱后进行激活扩散的计算，并给予参与计算的实体权重值并存入更新数据库。

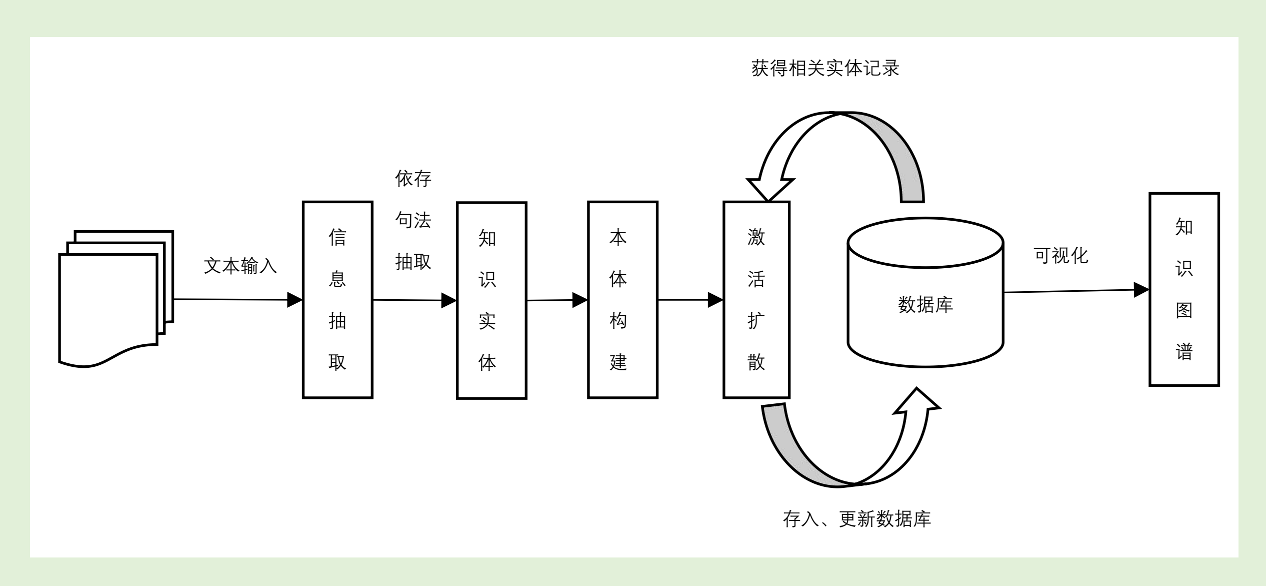


图 1 基于激活扩散模型的认知图谱构建流程图

基于激活扩散模型相关理论，本文中的激活扩散过程包含：激活能量的获得与分配、激活能量值的衰减、激活状态的判断、激活范围的限制四个环节。在激活扩散不断迭代的过程中，四个环节交替进行，可见下图：

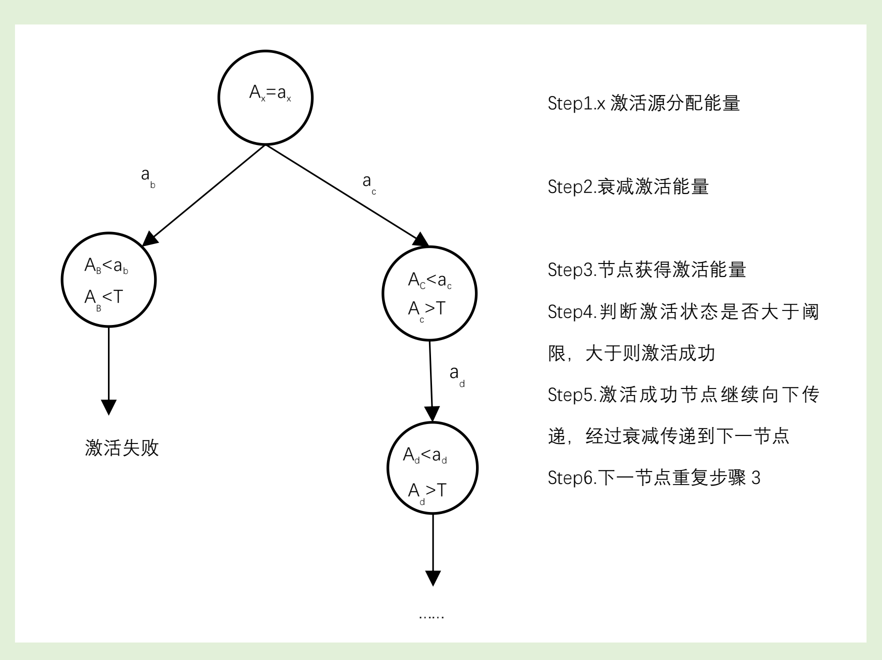


图 2 激活扩散模型步骤

图中我们使用 A 来表示激活扩散中节点的能量，下标表示对应节点，T 表示激活阈限，a 表示节点或边传递的能量值。

4.1 激活能量的获得与分配

在激活阶段，一个节点到其他连接节点之间存在大量的激活通道。在一个简单单元水平上，纯粹激活扩散模型的单元输入计算遵循以下公式（1）：

$$I_j = \sum_i O_k w_{ij}$$ 公式（1）

其中，I_j 表示节点 j 的总输入；O_i 表示与节点 j 链接的单元 i 的输出；w_{ij} 表示连接节点 i 和节点 j 的链接权重[22]。

在纯粹激活扩散中，一个单元的“激活”与单元的“输出”之间没有区别，单元的激活水平即视为它的输出值[22]，所以将输出值作为输入值的函数进计算，表示为公式（2）：

$$O_j = f(I_j)$$ 公式（2）

Anderson 则在他提出的记忆的激活扩散理论中，提出激活源发射的激活量是它们强度的函数。如果节点 n_y 收到来自于 n_1 到 n_i 的激活 a_{1y} 到 a_{iy}，它的激活水平则是 $\sum_i a_{iy}$。节点 n_x 发送到节点 n_1 到 n_y 的激活决定于每个节点的强度 s_1 到 s_j 以及节点 n_x 的激活水平。如果该节点的激活水平是 a_x，它发送到节点 n_k 的激活量就是 $l a_x s_k / \sum_j s_j$，其中，$s_k / \sum_j s_j$ 是从节点 n_x 到 n_k 的相对权重，l 与损失相关。对于所有与 n_x 相连的节点 j，令 $f_{xj} = l s_k / \sum_j s_j$，否则令其为 0，则有以下公式（3）[18]。

$$a_y = \sum_x f_{xy} a_x + c_y$$ 公式（3）

其中，c_y 是来自于激活源的激活量，当 y 不是激活源的时候，c_y=0。

综上，本文激活扩散模型能量分配的计算公式以及相对权重的计算公式，在对节点 x 的激活能量进行分配时可以表示如公式（4）：

$$a_y = a_x * \frac{W_{xy}}{\sum W_{(x)}}$$ 公式（4）

公式（4）表示从 x 节点传入 y 节点的能量分配公式，使用边权重计算，其中 $\frac{W_{xy}}{\sum W_{(x)}}$ 为相对权重。其中 a_x 为节点 x 输出的激活能量，a_y 为节点 y 接收的激活能量，W_{xy} 为节点 x 到节点 y 的激活通路的权重，也就是边权重，$\sum W_{(x)}$ 则为围绕并连接节点 x 的所有边权重之和，而围绕并连接节点 x 的所有边权重之和为节点 x 的节点权重。

此外，对于激活源能量的获取，由于其能量不是通过接收获得的，因此需要系统赋予其初始值。激活扩散模型中的激活源（sources of activation）是最开始被激活的节点，也

有论文中将其称为注意单元（focused units）。这里我们使用激活源作为激活的原点。激活源的能量就是激活源作为激活的原点进行激活扩散前所具有的能量。Anderson 曾认为激活源发射的激活量是它们强度的函数[18]，因此在激活扩散的过程中，在赋予激活源能量时最好将节点权重作为考量因素。

综上，由于对数函数具有递增得先快后慢的特点，且对于选取不同数量级的数据能够将映射值控制在较低水平范围，所以选取对数函数 y=lnx 作为函数对节点权重值进行映射，其映射结果作为激活源能量。设激活源能量为 A_i，激活源节点权重为 sum_weight_i，则有公式（5）：

$$A_i = \ln(sum_weight_i) \quad 公式(5)$$

4.2 激活能量值的衰减

在启发式原则中，两个节点之间的关系强度随着其语义距离的增加而减少。因此可以认为距离限制的激活扩散模型中需要采用广度优先的方式进行扩散，即先考虑一阶关系，再考虑二阶关系。其中，直接连接的两个节点之间的关系称为一阶关系。通过一个中间节点连接的两个节点之间的关系被称为二阶关系，而这种与扩散相关的条件是可以根据具体应用进行灵活设置。对应在激活能量值上，则表现为激活能量值的衰减，衰减是指激活能量值随着时间产生了衰退，这里可以理解为随着节点距离的增加能量产生了衰减。因此也有学者针对衰减提出了一些计算方法。例如：盛舸在定义激活扩散过程遵循的原则中使用上一时刻的输出乘以边的连接再乘以（1-α）作为下一时刻的输入，可表示为如下公式[23]：

$$I_y(t_{i+1}) = O_x(t_i) * w_{xy} * (1-\alpha) \quad 公式（6）$$

其中 $I_y(t_{i+1})$为节点 y 在 t_{i+1} 时刻的输入，$O_x(t_i)$ 为节点 x 在 t_i 时刻的输出，w_{xy} 为节点 x 与 y 的连接，而 α 为衰减因子，表示激活扩散过程中能量的衰减，而 α 一般取值 0.2。

Anderson 在他提出的记忆的激活扩散理论中也考虑了激活损失，若某节点的激活水平是 a_x，它发送到节点 n_k 的激活量就是 $l a_x s_k / \sum_j s_j$，这里 l 为激活中的损失，可以发现公式（3）中 x 节点沿某条边向 y 节点传递的能量为：能量损失、两节点间边的相对权重、节点 x 的能量三者的乘积。

再如，洪昆辉[24]提出的心理信息激活的公式，他提出心理状态单个状态变量的表达公式，表示为公式（7）：

$$P(x, t-1) = P(x, t-2) + A(x, t-1)d(x, t$$

) 公式（7）

其中$P(x,t-1)$表示对象 x 在 t-1 时刻的存在程度，它等于对象 x 在 t-2 时刻的存在程度加上$A(x,t-1)$（对象 x 在 t-1 时刻受到的激活启动效应）与$d(x,t)$（同时期启动效应的衰退量）的乘积，而同时期启动效应的衰退量可表达为公式（8）：

$$d(x,t)=ae^{-kt}$$ 公式（8）

本文中采用公式（6）中线性衰减的方式作为衰减函数，并表达为公式（9）：

$$Loss(x)=(1-0.2)*A_x$$ 公式（9）

其中 loss(x)表示节点 x 接收能量过程中的损失过程函数，A_x 表示 x 未损失的原始值。

4.3 激活状态的判断

在对输出进行的评估方面，常常使用一些函数来评估输出，其中广为使用的函数为阈值函数，常用来确定节点是否被激活，其原理为设置一个阈值，当节点 j 的输入值大于所设置的阈值则节点 j 被激活，否则认为节点 j 不是活跃的。阈值的设置可以根据具体的应用去确定，既可以设置为全局统一的阈值，也可以设置为根据不同节点而变化的阈值[22]。这里我们设置激活阈限 T 为一个固定值 0.2，这是由于我们已经将激活源能量值设置为与节点权重有关系的值了，如果再将激活阈限值设置为一个随着节点权重变化的值就会出现知识图谱中权重较高的节点将比起权重较低的节点更容易被激活，网络中的权重将更倾向于权重更高的节点，这种机制对于权重偏低但与其他节点联系较多的节点不公平。

当激活阈限值 T 为 0.2 时，则节点接收到的能量若达到 0.2 则该节点会被激活，若节点接收到的能量小于 0.2，则该节点不会被激活。若 x 节点最后接收到的能量为 A_x，则有：

$$is_activate=\begin{cases} true, & A_x \geq T \\ false, & A_x < T \end{cases}$$ 公式(10)

4.4 激活范围的限制

如果想把激活扩散限制在指定范围内进行，就需要对激活扩散的深度进行限制。深度则表示一个激活源节点 x 向下扩散的最大路径数，当节点 x 传递到下一级节点，即节点 x 的一级节点则扩散深度为 1，传到二级节点则扩散深度为 2，通过深度来控制激活扩散的扩散范围。例如图 3，当深度为 3 时，节点 x 最大扩散路径数为 3，则节点 x 可以从三条路径传递激活能量，激活能量扩散到的节点路径分别为 x->a->b->c、x->d、x->e->f->g，这里节点 h

不在扩散范围，这是因为从 x 到 h 经历了四条路径，即节点 h 对于节点 x 的深度为 4，因此不在激活扩散的范围内。

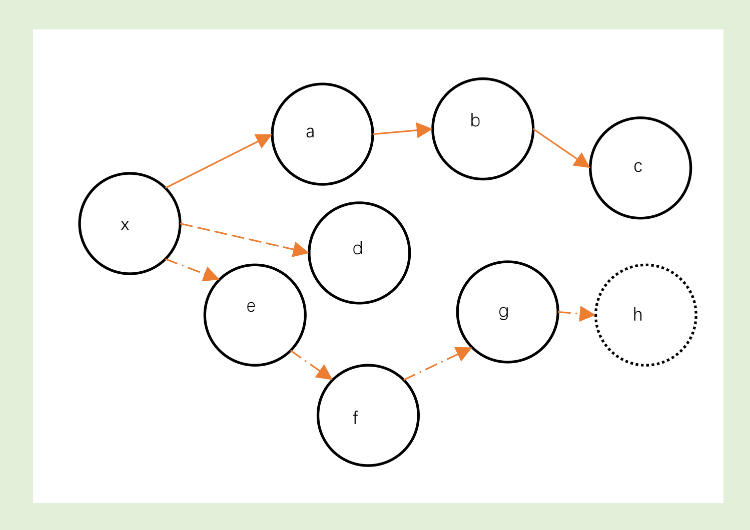


图 3 激活扩散深度控制

5 基于激活扩散模型构建的认知图谱应用效果分析

为了对比本文提出的认知图谱构建方法与传统的带权知识图谱构建方法构建出的可视化图谱的效果，选择中国神话故事作为实验材料，进行对比实验，这里传统带权知识图谱选择了基于统计频次的带权知识图谱。

5.1 认知图谱可视化演化进程

本研究通过对比基于激活扩散模型的认知图谱构建方法与根据频次统计赋权的认知图谱构建方法（权重大小按照频次的三倍进行赋权）的差异，分别选择不同样本量的篇章作为实验材料，见表 1，可以展示出认知图谱随着篇章量增加的演化进程。

表 1 实验语料

语料及序号	组别	实验语料序号分配
1. 嫦娥奔月 2. 共工触天 3. 后羿射日	一组	1-5
4. 精卫填海 5. 夸父逐日 6. 鲤鱼跃龙门		
7. 孟姜女哭长城 8. 年的由来 9. 女娲补天		
10. 铁拐李关鸭 11. 五指山的由来 12. 愚公移山	二组	1-10
13. 钻木取火 14. 八仙过海 15. 仓颉造字		
16. 大禹治水 17. 孔雀公主 18. 龙伯钓鳌		
19. 龙女拜观音 20. 牛郎织女 21. 女娲升天		
22. 女娲造人 23. 盘古开天 24. 神农尝百草	三组	1-15
25. 天将救人间		
	四组	1-20

五组　1-25

通过对不同规模的实验材料（按组别）进行输入（如表 1），分别使用基于频次统计赋权的认知图谱构建方法与基于激活扩散赋权的认知图谱构建方法，最终形成了两种不同规模下的认知图谱，可以观察两种认知图谱随着规模扩大的演变过程，见图 4。图谱中节点的大小可以表示节点权重的大小，边的粗细表示边权重的大小，使用颜色映射表现出认知图谱中不同权重等级的节点表示，颜色越鲜艳表示该节点权重处于认知图谱中较高水平。其中标注 Fre 的为基于频次统计的构建方式，标注为 ACT 的为基于激活扩散模型的构建方式。

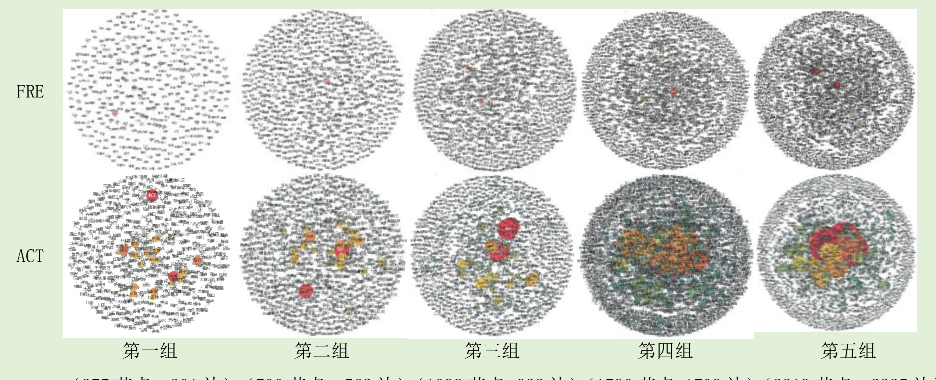


图 4 基于频次统计和基于激活扩散模型构建的认知图谱演化结果对比

从总体来看，随着规模的扩大，两种图谱都存在一些高权重水平节点的涌现，但基于频次统计的认知图谱其总体权重分布水平层次较少且权重数值相较于基于激活扩散的认知图谱普遍要低。观察基于激活扩散模型构建的认知图谱可以发现随着图谱范围的增大，认知图谱的权重水平分布呈现多层次的特点，在图中可以表现为出现不同颜色不同权重水平的代表性节点，这些节点均具有较高且不同的节点权重。从图谱整体上看，使用基于激活扩散模型的认知图谱构建方法构建的可视化图谱相较于使用频次统计赋予权重的认知图谱，其节点权重呈现多层次性，在少数局部节点权重值得到强化，因此在可视化后更能够突出认知图谱中的重要节点，这也在一定程度上降低了认知图谱受众的认知负荷。

从图谱的局部来看，激活扩散过程赋予了图谱中各节点不尽相同的权重增长。例如，第一组中，在频次统计认知图谱中权重最高最为突出的节点“太阳”，见图 5，在基于激活扩散模型构建的认知图谱中并不是权重值最高的节点，这表明经过激活扩散过程各个节点的权重值在整个图谱中的地位发生了一些变化，节点的权重并不决定于简单的频次叠加，而是经过激活扩散过程，即一系列复杂精确的计算后对权重值进行的少量多次地增加.从图 5 中我们可以看到,在基于频次统计构建的知识图谱中,“太阳”节点的权重由与其相连的边和节点所贡献,但我们缺乏依据去辨认哪个节点哪条边对“太阳”节点的权重贡献较大,而从基于激活扩散构建的认知图谱中,我们可以明显看到,节点“出现”、“一个”与“天上”对“太阳”

节点权重的贡献相较于其他节点较高。可见，相较于基于频次统赋予权重的认知图谱，基于激活扩散模型赋予权重的认知图谱具有一定的灵活性和更强的细节揭示能力以及强解释力。

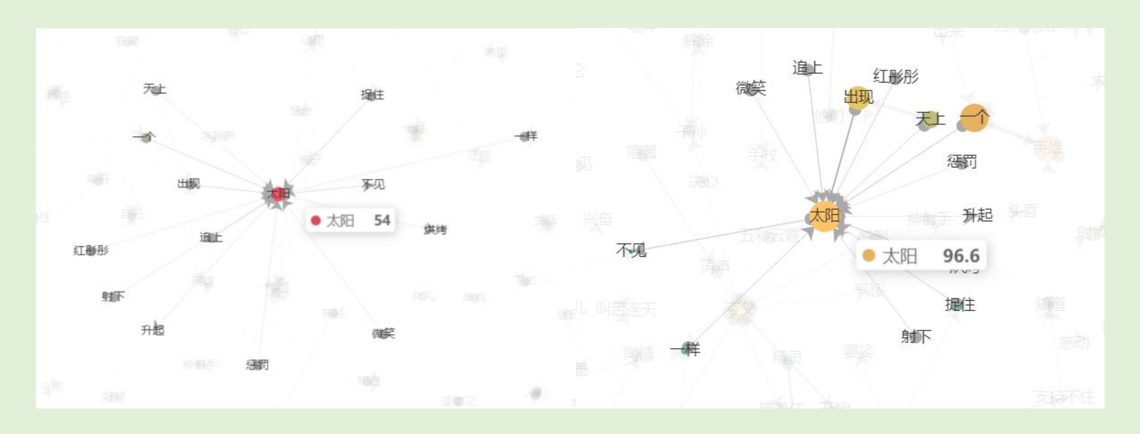


图 5 基于频次统计（左）与基于激活扩散模型（右）构建图谱对比

5.2 认知图谱中的权重分布差异

通过使用两种方法对第五组材料进行图谱构建，并以构建图谱中的节点权重数值分布与数量关系来做散点图，对比两种方法构建的图谱在权重分布上的差异。可以得到以下对比图，见图 6（其中红色散点“x”为基于频次统计的方法构建的图谱权重分布，蓝色散点“o”为本研究提出的基于激活扩散模型的方法构建的图谱权重分布。

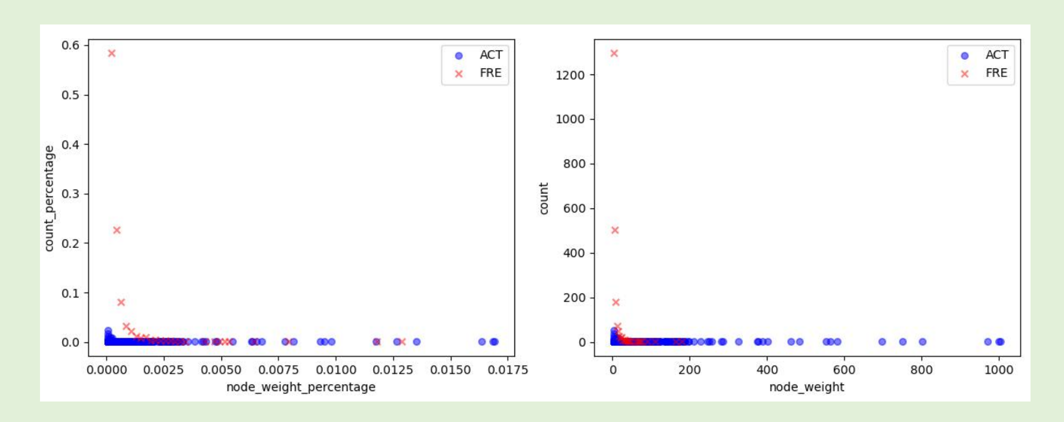


图 6 第五组的权重分布对比

图 6 中左侧为认知图谱中权重分布相关情况，横轴为节点权重，纵轴为节点数量，图上绘制点为该节点权重所具有的节点数量。右侧为认知图谱权重占比分布相关情况，横轴为节点权重在节点总权重中的占比，纵轴为节点数量在节点总数中的占比，图上绘制点为节点权重占比对应的节点数量占比。

从图 6 中可以发现，使用本研究提出的基于激活扩散模型的认知图谱构建方法的权重分布的散点数量比基于频次统计的认知图谱散点数量要多，且基于激活扩散模型的认知图谱构

建方法的权重值分布在较大的范围，这也再次印证了基于激活扩散模型的认知图谱中权重值处于不同的权重层次水平。权重值多层次化的结果就是每个散点的纵轴坐标，即处于该权重值上的节点数量变少了，但仔细观察可以发现，散点图的开始变化趋势仍然是一个呈现轻微下降趋势的三角形。

此外，这两种图谱的权重分布在图像上都呈现先密集再稀疏的特点，这表明图谱的权重值的分布集中在权重较低占比的层次，权重值具有的节点数也随着权重值占比普遍呈现下降趋势。

为进一步观察基于激活扩散模型构建的认知图谱权重分布的特点，探究基于激活扩散模型构建的认知图谱的权重分布图中三角区域形成的原因，绘制第一组到第五组基于激活扩散模型构建认知图谱的权重占比与节点数占比的图像如图 7：

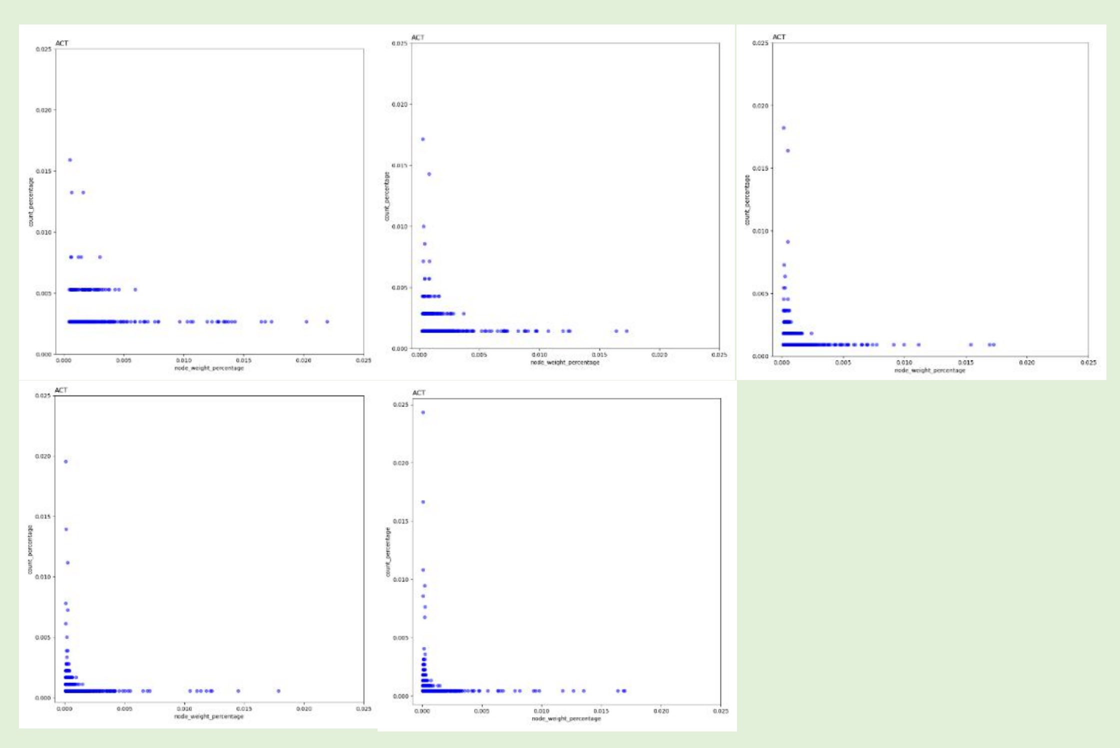


图 7 基于激活扩散模型构建认知图谱的权重分布图

由上图 7 可知，基于激活扩散模型的认知图谱规模的逐渐扩大，其纵轴上的数量分布出现逐渐由分层散点形成了连续散点的趋势，与此同时，除了数量占比较低的图像中最下层的散点外，各层次的散点在横轴上的范围随着图谱规模的扩大都有明显缩短的现象，这对应了其散点层次的增多。

从上图 7 中可以发现，权重占比较高的散点处于数量占比重较低位置，而数量占比较高的散点则处于权重占比较低的位置，这一点与使用基于频次统计的认知图谱构建方法形成的权重分布图的规律是一致的，也与无标度网络的规律相符合。但不同的是，在基于激活扩散模型构建的认知图谱权重分布图中存在着多散点图构成的“面积”，见下图 8，这与认知图谱中权重数值分布更广泛有关。

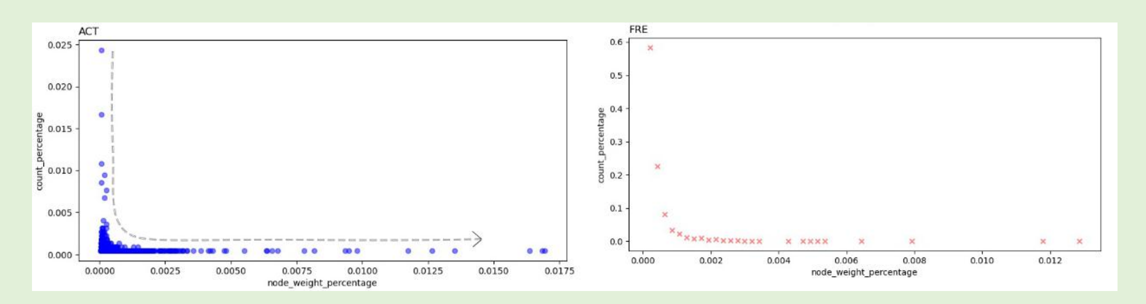


图 8 两种认知图谱构建的权重分布图对比(2219 节点)

通过对两种方法构建的认知图谱绘制的权重分布散点图可以发现，使用基于激活扩散模型构建的认知图谱相较于基于频次统计构建的认知图谱其图像的下降趋势一致，都随着节点权重占比的增加其节点个数占比反而降低，即在认知图谱中权重较高的节点数量在认知图谱中占有少数，而权重较低的节点数量在认知图谱中占有多数。

5.3 认知图谱对于因果不对称性的证明

人的认知往往是层层递进的，即不同的学习顺序产生的学习结果是不一样的。物理学家和信息理论学家认为宇宙系统中存在“因果不对称性”，在经典计算机领域，计算机软件更容易预测某个复杂系统在未来的发展走向却难以推测系统过去的活动。即沿着时间的某一方向前进，会比另一方向需要更多的信息和更复杂的运算。荣美曾将因果不对称性引入到概念认知学习领域，并通过概念树可视化来表示因果不对称性[25]。使用本研究提出的构建认知图谱的方法也具有可视化认知过程的功能。为了展示因果不对称性，通过对五篇篇章和二十五篇篇章分别进行顺序和逆序输入，构建基于激活扩散模型的认知图谱，对比最终形成的不同权重分配的认知图谱可视化结果，实验材料及各组别输入顺序如表 2:

表 2 实验语料

篇章及序号	组别	实验语料序号分配
1.嫦娥奔月 2.共工触天 3.后羿射日	第一组	5
4.精卫填海 5.夸父逐日 6.鲤鱼跃龙门		4
7.孟姜女哭长城 8.年的由来 9.女娲补天		3
10.铁拐李关鸭 11.五指山的由来 12.愚公移山		2
13.钻木取火 14.八仙过海 15.仓颉造字		1
16.大禹治水 17.孔雀公主 18.龙伯钓鳌	第二组	25，24，23，22，21
19.龙女拜观音 20.牛郎织女 21.女娲升天		20，19，18，17，16
22.女娲造人 23.盘古开天 24.神农尝百草		15，14，13，12，11
25.天将救人间		10，9，8，7，6
		5，4，3，2，1

通过对上表中的五篇篇章和二十五篇文章分别进行顺序和逆序输入构建基于激活扩散模型的认知图谱可以得到两组认知图谱可视化结果如下：

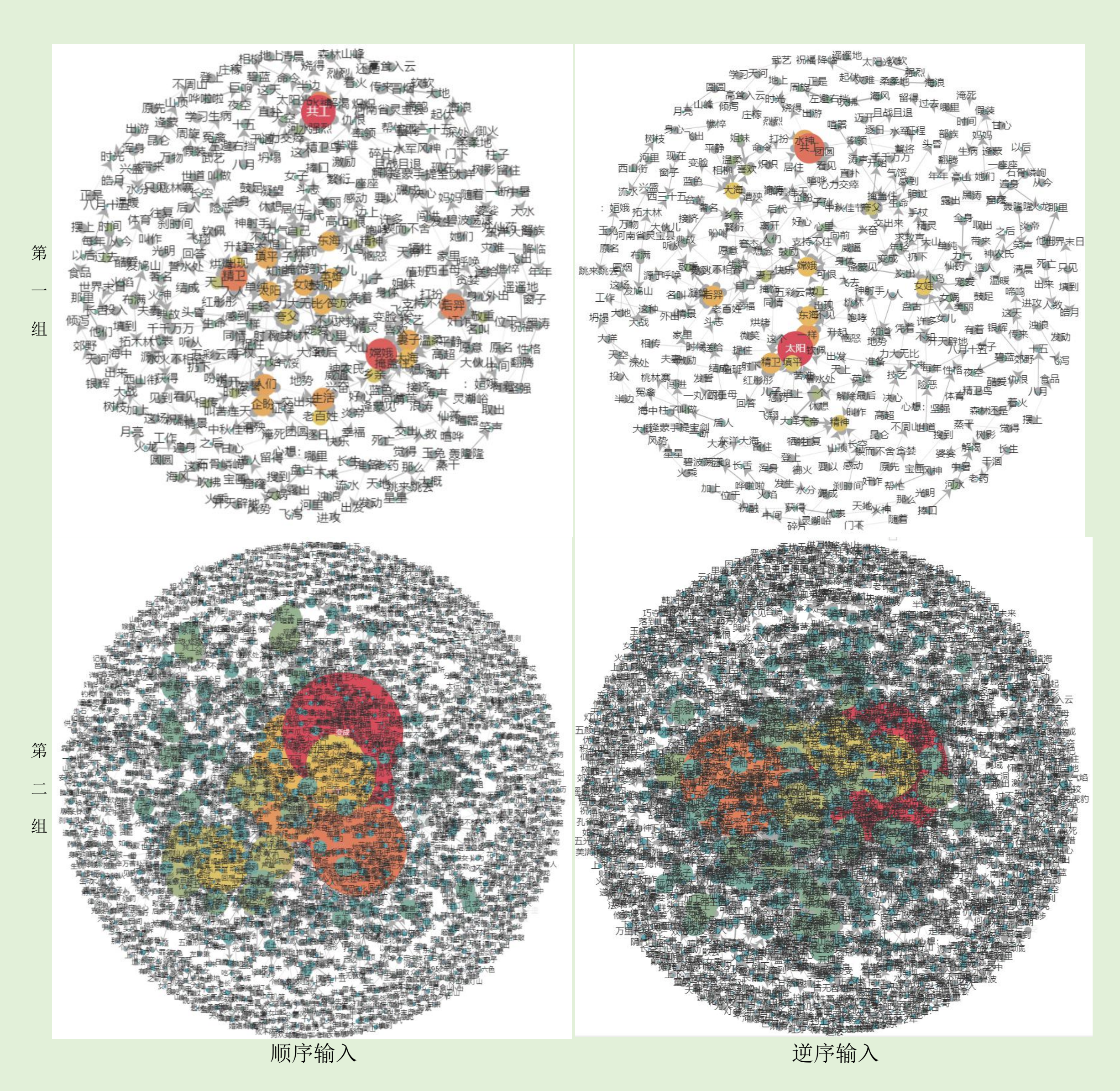


图 9 基于激活扩散模型构建认知图谱的顺序逆序对比

从第一组实验中，我们可以发现，节点“嫦娥”在顺序图谱中的权重水平高于逆序中的权重水平，这可能是由于《嫦娥奔月》处于顺序图谱中的第一篇，而处于逆序图谱中的最后一篇。节点“共工”在顺序图谱中的权重水平也要高于在逆序图谱中的权重水平，也可以解释为《共工触天》在顺序图谱中的第二篇，在逆序图谱中为第四篇。这里的权重水平并非完全代表权重值的大小，而是在图谱网络中节点的相对地位，并且存在图谱中某节点对比另一个图谱中的该节点权重水平高但权重值低的情况，例如“共工”节点，在顺序图谱中权重值 164.27，在逆序图谱中权重值 168.65，但通过与整个图谱的最高节点权重进行比较产生的颜色映射可以发现，顺序图谱中节点“共工”的权重水平要高于逆序图谱中节点“共工”的权重水平。当然这种规律并非会造成绝对的可视化结果，由于激活扩散模型的灵活性，仍然存在多种可能结果，一个节点在图谱中的权重水平不仅取决于该节点以及与其相连的其他节点，也取决于随后输入的文本材料，更受到随后输入的文本材料顺序的影响。

第二组通过对二十五篇文章进行顺序输入和逆序输入，可以更明显发现权重分布的不同，

随着篇章输入的增多，篇章主题节点的权重将不会成为较高权重水平的节点，这主要是由于随着篇章数增多，一些相同概念出现在不同篇章中，将成为更多周围节点的枢纽，成为出现频次更多的节点，这种节点将在图谱中占有较高的权重。这些概念通常为句子中常见的词语。通过顺序、逆序分别构建基于激活扩散模型的认知图谱并对节点权重值进行排序，对一些无意义虚词进行过滤后可以发现其排名前 20 的节点如下（25 篇文本共形成 2219 个节点 2225 条边）：

表 3 顺序逆序权重排名前 20 节点对比

顺序		逆序	
节点	权重值	节点	权重值
变成*	1005.18	一个*	909.79
一个*	999.63	自己*	722.38
来到	971.91	劳动	508.12
地方	802.24	和尚	420.23
精灵	750.33	太阳	400.66
英雄	696.58	姑娘*	334.59
嫦娥	581.69	人间	312.44
妻子	563.5	大地	306.51
姑娘*	554.01	生活*	289.67
翠花	484.49	玉皇大帝	272.33
自己*	461.42	上山	265.28
生活*	402.02	光芒万丈	245.13
女娲*	389.38	呆烦	242.86
他们	377.54	召树屯	239.24
人们*	376.15	世界	233.84
盘古*	326.45	巨人	227.68
老百姓	285.4	变成*	221.26
企盼	280.85	人们*	220.45
没有	256.39	盘古*	213.36
那里	250.64	女娲*	212.51

经过对比可以发现，正序和逆序中权重排名前 20 的节点范围内的共同节点有 8 个，分别是“变成”、“一个”、“姑娘”、“自己”、“生活”、“女娲”、“人们”、“盘古”。这些节点无论在顺序图谱和逆序图谱中都处于较高权重水平，而范围内的其余节点由于受到了输入顺序的影响，不同程度地发生了权重水平的变化。这即表明了基于激活扩散模型构建认知图谱凸显高权重节点的可靠性，又展现了该构建方法的灵活性。相同篇章在不同顺序输入下会形成不同权重分配的认知图谱，这是由于激活扩散模型本身符合这种认知规律，即先纳入图谱的节点在刚开始时会具有更多被激活的机会，从而在早期会获得更多的权重。这种规律也符合马太效应的现象，即先放入网络中的节点度值相对于后面节点来说呈现幂指数的增长，即一个节点越早放入网络中积累的连边越多。而这种不同顺序导致不同的可视化结果表明使用该方法构建的认知图谱可以证明因果不对称性。

6 结语

本文针对当前认知图谱缺乏认知智能的困境，提出了基于激活扩散模型构建认知图谱的方法，通过设计激活扩散过程赋予认知图谱节点不同强度的权重值，以此作为认知图谱检索、推理的相关依据。通过对本文所提出基于激活扩散模型构建的认知图谱与基于频次统计的认知图谱进行对比实验，结果显示本文提出的认知图谱赋予的图谱节点权重的机制因为在细节揭示能力上优于基于频次统计构建的认知图谱而具有强解释力，且其权重值更具有多层次性，可以降低认知负荷，整个认知图谱模拟人的认知结构，具有灵活性的特征，此外，该认知图谱演化结果与输入材料顺序相关的特性也可以证明因果不对称性。

本文提出的认知图谱可以应用于多个场景，例如知识推荐、知识检索、知识问答等。对认知图谱赋予权值是对认知图谱认知智能的一次优化，最直接的应用是优化后的认知图谱可视化将携带权重信息，从而帮助认知图谱进行认知推理和判断。

本研究所构建的认知图谱具有不受领域限制的特点，尤其是激活扩散进程，由于符合认知规律可以应用于各个领域的认知图谱构建中，但这也表明其存在着赋权机制考虑条件过于单一的问题，由于节点类型并未区分重要程度，所以在构建需要对节点进行分类处理的认知图谱时存在不足，此时需要设计与扇出限制的激活扩散有关的激活扩散进程，这需要在未来的工作中进一步讨论。

参考文献

[1] 张玉柳,赵波.国内外知识图谱发展趋势和研究热点演变分析[J].图书馆理论与实践,2021(4):8.

[2] Du Z , Zhou C , Ding M ,et al.Cognitive Knowledge Graph Reasoning for One-shot Relational Learning[J]. 2019.DOI:10.48550/arXiv.1906.05489.

[3] 袁满,张维罡,李明轩.基于认知图谱的智能问答系统推理模型研究[J].吉林大学学报(信息科学版), 2021(005):039.

[4] R E C,H W W. From cognitive maps to cognitive graphs.[J]. PloS one,2014,9(11).

[5] Peer M , Brunec I K , Newcombe N S ,et al.Structuring Knowledge with Cognitive Maps and Cognitive Graphs[J].Trends in Cognitive Sciences, 2020, 25(1).DOI:10.1016/j.tics.2020.10.004.

[6] 赵国庆,李欣媛,路通,等.从认知地图到认知图谱:相似概念的跨学科审视[J].现代远程教育研究, 2021, 033(005):14-25.

[7] 张洲英.知识受众认知研究[D].武汉大学,2004.

[8] Sternberg R J. Beyond I Q[M].Cambridge England :Cambridge University Press 1985.

[9] Ding M , Zhou C , Chen Q ,et al.Cognitive Graph for Multi-Hop Reading Comprehension at Scale[J]. 2019.DOI:10.18653/v1/P19-1259.

[10] 王忠群,叶安杰,皇苏斌,等.基于知识图谱的在线商品评论可信性排序研究[J].情报理论与实践, 2020, 43(8):6.DOI:10.16353/j.cnki.1000-7490.2020.08.020.

[11] 孙昊天,杨良斌.基于带权三元闭包的知识图谱的构建方法研究[J].情报杂志, 2019, 38(6):6.DOI:10.3969/j.issn.1002-1965.2019.06.025.

[12] 褚润夫. 基于认知图谱的井下作业知识推荐系统研究[D].东北石油大学,2022.DOI:10.26995/d.cnki.gdqsc.2022.000313.

[13] 田靖.核心素养视野下信息技术课目标的重定向——以初中信息技术《初识 Flash》为例[J].中国信息技术教育,2021(03):33-35.

[14] 刘璐,蔡永明.基于语义加权的引文网络社区划分研究[J].新世纪图书馆,2021.DOI:10.16810/j.cnki.1672-514X.2021.01.009.

[15] 王现臣. 融合语义特征的加权二分网络预测研究和应用[D].天津大学,2019.DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2019.004612.

[16] 熊回香,唐明月,叶佳鑫等.融合加权异质网络与网络表示学习的学术信息推荐研究[J].现代情报,2023,43(05):23-34.

[17] Pace-Sigge M .Spreading Activation, Lexical Priming and the Semantic Web[M]. 2018.

[18] Anderson R J. A spreading activation theory of memory[J]. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior,1983,22(3).

[19] Collins, Loftus A M , Elizabeth F .A spreading-activation theory of semantic processing.[J].Psychological Review, 1975.DOI:10.1037/0033-295X.82.6.407.

[20] 刘峤,李杨,段宏等.知识图谱构建技术综述[J].计算机研究与发展,2016,53(03):582-600.

[21] 徐增林,盛泳潘,贺丽荣,王雅芳.知识图谱技术综述[J].电子科技大学学报, 2016, 45(4):18.DOI:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.04.012.

[22] Crestani F .Application of Spreading Activation Techniques in Information Retrieval[J].Artificial Intelligence Review, 1997, 11(6):453-482.DOI:10.1023/A:1006569829653.

[23] 盛舸.基于语义网络策略用户本体模型设计与实现[D].电子科技大学

[2023-07-10].DOI:CNKI:CDMD:2.1015.711520.
[24] 洪昆辉. 论心理活动信息激活的相似性原理[C]//云南省思维科学学会.中国思维科学研究论文选 2011 年专辑.[出版者不详],2012:673-689.
[25] 荣美.概念认知学习增量演化特性研究[D].燕山大学[2023-07-10].